BALLISTISCHE MESSUNGEN DER MAGNETISCHEN INDUKTION BEI NICKELRINGEN.

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR

ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE

DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT

DER

VEREINIGTEN FRIEDRICHS-UNIVERSITÄT

HALLE-WITTENBERG

ACAD. LUGD. BAT. BIBL.

VORGELEGT VON

RICHARD REINICKE

AUS CÖTHEN (ANHALT).

HALLE a. S.
HOFBUCHDRUCKEREI VON C. A. KAEMMERER & CO.
1908.

Referent: Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. **E. Dorn.**

Termin der mündlichen Prüfung: 25. Juli 1908.

Meinen lieben Eltern!

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41544709_0086

Inhaltsverzeichnis.

Seite

I. Historische Übersicht 7
II. Chemische Analyse des Materials 9
1. qualitativ 9
2. quantitativ 10
III. Versuchsanordnung und Apparate 13
1. Primärkreis 13
2. Sekundärkreis 16
IV. Formeln zur Berechnung von $\mathfrak{H}$ und $\mathfrak{B}$ 18
V. Der massive Nickelring 18
VI. Die Versuchsreihen 20
VII. Ergebnisse 30
VIII. Theoretische Erklärungsmöglichkeiten und ihre experimentelle Prüfung 34
1. Wirbelströme 34
2. Nachwirkung 38
3. Molekulare Trägheit 43
4. Molekularinduktionsströme 44
IX. Endresultat 45

Da die ballistische Methode eine stetige Magnetisierung vorzunehmen nicht gestattet und sich demgemäss auf einen stufenweisen Prozess beschränken muss, wobei die Auswahl der Stufenzahl natürlich immer der Willkür des Experimentators unterworfen ist, so wurde angesichts der grossen Verwickeltheit der magnetischen Verhältnisse überhaupt die Frage nahegelegt: Ist die Stufenzahl von Einfluss auf den magnetischen Endzustand?

I. Historische Übersicht.[1])

Schon zahlreiche Versuche haben eine Lösung des aufgeworfenen Problems angestrebt.

„So haben Gumlich und Schmidt[2]) Rotationsellipsoide aus Eisen und aus Stahl daraufhin untersucht und gefunden, dass insbesondere bei weichem Material eine solche Abhängigkeit tatsächlich vorhanden ist. Es nahm in schwachen Feldern die Maximalinduktion mit der Grösse der Stufen zu. In starken Feldern war dagegen der Unterschied in der Maximalinduktion nicht merklich, wohl aber zeigte sich mit wachsender Stufenzahl eine Abnahme des remanenten Magnetismus und der Koërzitivkraft. Zu einem bei schwachen Feldern gleichen Ergebnisse hatten schon

---

1) Ich nehme diese historischen Notizen z. T. direkt herüber aus der Arbeit von F. Rücker. Inaug.-Diss. Halle. 1905. Seite 7—8.

2) E. Gumlich und E. Schmidt. Über den Unterschied zwischen stetiger und unstetiger Magnetisierung. Elektrotechn. Zeitschr. Bd. 21. Jahrg. 1900. Seite 233.

früher Beobachtungen nach der ballistischen Methode geführt. So fand H. Lehmann[1]) gelegentlich seiner Untersuchungen über die Magnetisierung radial geschlitzter Toroide, dass „„die Summe der Magnetisierungsänderungen, welche das J (= Intensität der Magnetisierung) für das höchste angewendete $\mathfrak{H}$ (= Feldstärke) ergab, um so kleiner ausfiel, je grösser die Zahl der Schritte war, die zu diesem $\mathfrak{H}$ führte““. Die gleiche Beobachtung machten auch M. Wien[2]) und M. Heyse.[3]) Da aber alle diese ballistischen Versuche nicht auf verschiedene Feldstärken ausgedehnt wurden, so konnte man sich über das Auftreten der beobachteten Erscheinung bei verschiedenen Feldstärken nur auf Vermutungen stützen. Lehmann meint, der auftretende Unterschied sei nur in schwachen Feldern merklich. Wien glaubt, dass sich auch bei höheren Feldstärken noch Unterschiede finden würden. . . . Heyse endlich spricht ganz allgemein die Ansicht aus, „„dass weniger Stufen bis zu derselben Höhe der magnetisierenden Kraft ein grösseres $\mathfrak{B}$ liefern““. Die erwähnten Beobachtungen nach der ballistischen Methode beziehen sich auf ringförmige Versuchsstücke.“

In der Absicht, an die Stelle jener blossen Mutmassungen Klarheit zu setzen, nahm im Jahre 1904 Franz Rücker im hiesigen Physikalischen Institut das Problem in systematischer Weise in Angriff. Er untersuchte nach dem ballistischen Verfahren Eisen- und Stahlringe, und zwar sowohl massive als auch aus aufgewickeltem Draht hergestellte, bei verschiedenen Feldstärken und fand schliesslich eine gesetzmässige Beziehung zur Permeabilität:[4]) „Bei der Magnetisierung von Ringen aus Eisen und Stahl zeigt sich bei hohen Werten der Permeabilität ein merklicher Einfluss der

1) H. Lehmann. Magnetisierung radial geschlitzter Eisenringe. Wied. Ann. Bd. 48. 1893. Seite 422.

2) M. Wien. Über die Magnetisierung durch Wechselstrom. Wied. Ann. Bd. 66. 1898. Seite 860 ff.

3) M. Heyse. Inaug.-Diss. Halle. 1901. Seite 33.

4) F. Rücker. l. c. Seite 105.

Stufenzahl . . . Bei niederen Werten der Permeabilität ist dieser Einfluss gering."

Es lag nahe, auch andere ferromagnetische Substanzen in Bezug auf diese Verhältnisse zu prüfen unter dem Gesichtspunkte, eine eventuelle allgemeinere Gesetzmässigkeit zu finden. Auf gütige Anregung und mit steter liebenswürdiger Anteilnahme und Unterstützung des Herrn Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. Dorn zog ich daraufhin zunächst einen massiven Nickelring, später auch einen Nickeldrahtring in den Bereich meiner Untersuchungen.

II. Chemische Analyse des Materials.

Zuvor musste durch chemische Analyse ermittelt werden, ob das mir zur Verfügung gestellte, von den Nickelwerken zu Schwerte in Westfalen gelieferte und als technisch rein bezeichnete Material dem Zustande chemischer Reinheit möglichst nahekomme, beziehungsweise bis zu welchem Grade dies der Fall sei. Massgebend musste vor allem die Prüfung auf die übrigen ferromagnetischen Substanzen, Eisen und Kobalt, sein, die in der Natur fast regelmässig mit dem Nickel vergesellschaftet vorkommen und von diesem nur sehr schwer zu trennen sind. (So sind z. B. die im Handel erhältlichen Nickelsalze ausnahmslos kobalthaltig.)

1. Qualitative Analyse.

Es wurden etwa 5 g vom Abdrehen des Ringes herrührende, vorher zwecks Entfernung oberflächlicher Verunreinigungen schwach angeätzte Nickelabfälle in verdünnter, heisser Salpetersäure gelöst, stark verdünnt, mit festem Rhodankalium im Überschuss versetzt und mit einem Gemisch von etwa gleichen Volumina Amylalkohol und Äther ausgeschüttelt. Der tief blutrot gefärbte Auszug wurde im

Scheidetrichter von der übrigen Flüssigkeit getrennt und das ganze Verfahren mit dieser letzteren noch zweimal wiederholt. Die Färbung der drei vereinigten Auszüge zeigte ohne Weiteres die Anwesenheit von Eisen an — infolge Bildung von $Fe(CNS)_3$.

Um daneben etwaiges Kobalt nachzuweisen, wurde Sodalösung vorsichtig tropfenweise zugesetzt, wodurch das Eisen als flockiges, braunes Ferrihydroxyd abgeschieden wurde. War Kobalt zugegen, so musste sich dasselbe kundtun durch eine zurückbleibende Blaufärbung infolge Bildung der durch Soda nicht zerstörbaren Komplexverbindung

$$[Co(CNS)_4]K_2.$$

In der Tat zeigte sich nach dem Fortnehmen der Eisenfärbung ein wenn auch äusserst schwaches Blau, und es war somit auch der Nachweis für Kobalt erbracht.

2. Quantitative Analyse.

Nach diesen qualitativen Feststellungen schritt ich zur quantitativen Bestimmung. In Anbetracht der immerhin nur geringen zu erwartenden Mengen Eisen und Kobalt ging ich von ungefähr 30 g meines Materials aus. Um oberflächliche Verunreinigungen zu entfernen, wurde die Substanz zunächst einige Zeit mit verdünnter, heisser Salpetersäure angeätzt, darauf sorgfältig abgespült, im Trockenschrank bei 100^0 von dem anhaftenden Wasser befreit und nach dem Erkalten im Exsikkator zur Wägung gebracht. Alsdann wurde sie durch längeres Digerieren mit frisch destillierter, verdünnter, heisser Salpetersäure gelöst.

Die Abscheidung des Eisens hätte am zweckmässigsten nach der Acetatmethode erfolgen sollen. Dieselbe war indessen im vorliegenden Falle wegen der grossen Nickelmenge nicht gut anwendbar, da die notwendig werdende sehr starke Verdünnung ein schnelles Abfiltrieren in der Hitze und damit eine quantitative Abscheidung überhaupt erschwert hätte.

Auch die Baryumkarbonatmethode ist gerade bei Gegenwart von Nickel unzulässig.

So sah ich mich denn genötigt, die Eisenfällung vorerst mit Ammoniak in Gegenwart von viel Chlorammonium vorzunehmen, wobei beträchtliche Mengen Nickel — erkennbar an der schmutzig-grünen Färbung des Niederschlages an Stelle des reinen rotbraunen Ferrihydroxyds — mitgerissen wurden. Das Filtrat erwies sich dahingegen als von Eisen frei. Nachdem so das meiste Nickel entfernt war, wurde der Niederschlag in verdünnter Salzsäure wieder aufgenommen und nunmehr die Acetattrennung durchgeführt. Um etwaiges Aluminium (vielleicht beim Schmelzen des Nickels aus dem Tiegel spurenweise aufgenommen) zu entfernen, nahm ich darauf eine Fällung mit überschüssiger Kalilauge vor. Da der sich so ergebende Niederschlag sich wegen des Gehaltes an mitgerissenem Alkali zur Wägung nicht eignet, wurde er wiederum in verdünnter Salzsäure gelöst und zum Schluss die Fällung des Eisens nochmals mit Ammoniak durchgeführt. Das gut ausgewaschene, fast trockene Filter mit Inhalt wurde in einem Porzellantiegel geglüht und endlich die Wägung des Eisens als Fe_2O_3 vorgenommen.

Zwecks Kontrolle führte ich in dieser Weise zwei Analysen neben einander aus. Nachstehend gebe ich die Resultate wieder:

Ausgangssubstanz (gewogen)	Fe_2O_3 (gewogen)	Fe (berechnet)	Fe
I. 27,3863 g	0,1631 g	0,1142 g	0,417 %
II. 31,4239 g	0,1800 g	0,1260 g	0,401 %
		Mittel:	0,409 %
		= fast genau	0,41 %

In der Nickelmasse des Ringes sind demnach insgesamt an Eisen vorhanden[1])

0,4175 g.

1) Vergl. Seite 19.

Hierauf versuchte ich, in den vereinigten und eingedampften Filtraten die äusserst schwierige Trennung des Kobalts vom Nickel auszuführen. Bei der ersten Probe brachte ich die Fischersche Kaliumnitritmethode zur Anwendung, während Lösung II nach v. Knorre und Ilinsky[1]) in salzsaurer Flüssigkeit mit einer Lösung von α-Nitroso-β-Naphtol in Eisessig versetzt wurde. Beide Verfahren sind unter den vorliegenden Umständen wohl als die zuverlässigsten überhaupt anzusehen. Indessen entstand in beiden Fällen auch nach dreitägigem Stehen keine Spur eines kobalthaltigen Niederschlages.

Wenn im Gegensatz zu diesem Ergebnis die qualitative Vorprüfung die Anwesenheit von Kobalt ergeben hatte, so dürfte die Erklärung für die Nichtausfällung sehr einfach darin zu suchen sein, dass es sich nur um ganz minimale Spuren gehandelt haben wird. Beide Rhodanreaktionen, die auf Eisen sowohl als auch die auf Kobalt, sind nämlich ganz enorm empfindlich. So gibt beispielsweise Treadwell[2]) an, dass die Kobalt-Blaufärbung „noch deutlich erkennbar sei, wenn die Lösung nur 0,02 mg Kobalt enthält". Im vorliegenden Falle würde danach ein Gehalt von nur 0,0005 % bereits ausreichend sein, um die Reaktion eintreten zu lassen.

So hat also die Analyse zu dem Resultat geführt:

Das Material des massiven Nickelringes ist verunreinigt durch 0,41 % Eisen, ausserdem durch äusserst geringe Mengen Kobalt.

Genau in derselben Weise wurde später eine Analyse des Nickeldrahtes vorgenommen. Ergebnis:

Ausgangssubstanz	Fe_2O_3	Fe	Fe
8,3194 g	0,0496 g	0,0347 g	0,42 %.

Auch hier liess sich kein Kobalt quantitativ abscheiden, obwohl seine Anwesenheit festgestellt war.

1) Ber. d. deutsch. chem. Ges. 18, 699 (1885); ferner: Zeitschr. f. analyt. Chem. 24, 595 (1885).

2) Treadwell. Kurzes Lehrb. d. analyt. Chemie. I. Band. 3. Aufl. 1904. Seite 127.

Der Nickeldraht enthält demnach qualitativ und quantitativ merklich die gleichen Verunreinigungen durch ferromagnetische Körper wie das massive Nickel.

III. Versuchsanordnung und Apparate.

Was die Versuchsanordnung anbetrifft, so lehnte ich mich natürlich an Rücker an und benutzte im wesentlichen die schon von ihm des Näheren beschriebenen, dem Institutsinventar entnommenen Apparate. Da immerhin, dem besonderen Zweck entsprechend, einige Abänderungen unerlässlich waren, so will ich mich an der Hand der angehängten schematischen Figur 1 auf eine kurze prinzipielle Erläuterung einlassen.

1. Primärkreis.

Um gleiche Stufen zu erhalten, d. h. um den primären Strom immer um je gleiche Beträge zu verstärken bez. zu verringern, bedurfte es vor allem eines entsprechenden, bequem zu handhabenden Rheostaten. Allen Ansprüchen genügt der auch schon von Rücker benutzte, von Herrn Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. Dorn entworfene Bügelrheostat B. Unter Bezugnahme auf die von Rücker[1]) gegebene ausführliche Beschreibung will ich hier nur soviel bemerken, dass dieser Apparat im Prinzip darauf beruht, dass durch sukzessives Parallelschalten von je 1, 2, 3, 4, . . . 24 von 24 überhaupt vorhandenen, unter sich gleichwertigen Widerstandsrollen der zunächst eingeschaltete Widerstand auf $^1/_1$, $^1/_2$, $^1/_3$, $^1/_4$ . . . $^1/_{24}$ seines Wertes herabgesetzt, die Stromstärke also bei konstant gehaltener elektromotorischer Kraft im Verhältnis 1 : 2 : 3 : 4 . . . : 24 gesteigert wird. Derselbe Weg kann natürlich auch rückwärts durchlaufen werden. Eine sehr

1) F. Rücker. l. c. Seite 11—15.

sinnreiche Schaltungsvorrichtung ermöglicht es ferner, nicht nur die einzelnen Rollen sukzessive parallel zu schalten, sondern auch je 2, 3, 4, 6, 8, 12, 24 auf einmal. Auf diese Weise wird immer derselbe Endeffekt erzielt: es wird dieselbe maximale Stromstärke erreicht — aber mit verschiedener Stufenzahl

24, 12, 8, 6, 4, 3, 2, 1.

Wegen der, wie sich nachher bei den eigentlichen Versuchen zeigte, bei verschiedener Stufenzahl nur in sehr geringem Grade vorhandenen Unterschiede einerseits, anderseits, um die Versuche nicht nutzlos allzu sehr zu häufen und dadurch die Resultate weniger markant hervortreten zu lassen, begnügte ich mich mit der Anwendung der Stufenzahlen

24, 12, 6, 3, 1.

In sehr schwachen Feldern, wo die Empfindlichkeit des Galvanometers nicht mehr ausreichte, um die bei grosser Stufenzahl, also kleiner Intensitätsänderung, auftretenden Induktionsstösse zu messen, beschränkte ich mich, wie die Tabellen zeigen, auf die grösseren Stufen.

Es lag der Gedanke nahe, die so entstehende Lücke durch Verwendung eines empfindlicheren strommessenden Instrumentes, etwa des Panzergalvanometers nach Du Bois und Rubens, auszufüllen. Es zeigte sich indessen bei den Vorversuchen, dass dieser Apparat bei weitem nicht mit der Genauigkeit arbeitete, wie das weniger empfindliche, sonst durchweg benutzte Edelmann-Galvanometer. Die Erklärung hierfür ist darin zu suchen, dass die Empfindlichkeit des Panzergalvanometers sich innerhalb längerer Zeiträume nicht unerheblich ändern kann, und die in Frage stehenden Versuchsreihen erstreckten sich auf eine Dauer von bis zu 8 bis 9 Stunden. Ein zwischendurch erfolgendes Kontrollaichen aber konnte nicht vorgenommen werden.

Wenn nun der erwähnte Rheostat wirklich exakt arbeiten sollte, so musste noch eine weitere Vorbedingung erfüllt sein: der Widerstand des übrigen Stromkreises musste nach

Möglichkeit verringert werden — soweit das in Anbetracht des immerhin merklichen Widerstandes vor allem der Primärwicklung des Ringes überhaupt durchführbar ist. Es war also selbstverständlich nicht angängig, die verschiedenen Feld- bezw. die dazu erforderlichen Stromstärken durch Einschalten von mehr oder weniger Ballastwiderstand herzustellen. Abgesehen davon, dass ich die Verbindungsdrähte so kurz wie möglich wählte und sie ausserdem aus 2 mm dickem Kupferdraht fertigte, verfuhr ich daher so:

In dem durch einen technischen Widerstand T variierbaren, von der Stromquelle A (durchweg repräsentiert durch fünf grosse Akkumulatoren des Instituts von 90 Amp.-Stunden Kapazität) gespeisten Hauptstromkreis war ein etwa 1 mm dicker Manganindraht M (zwischen den Klemmen m und n ungefähr 1 m lang) eingeschaltet, von dem mittels der Klemmen m und o der eigentliche Gebrauchsstrom in zweckentsprechender Weise abgezweigt wurde.

Aber auch diese Anordnung war noch nicht ausreichend, da sich zeigte, dass das zur Strommessung dienende Präzisionsamperemeter von Siemens & Halske einen zu hohen Eigenwiderstand besass. Es wurde daher hier wiederum das Prinzip der Stromverzweigung in Anwendung gebracht:

In den Verbrauchsstromkreis wurde ein kurzer Manganindraht N eingefügt derart, dass der von seinen Endklemmen abgezweigte Strom an dem (zu einem Pyrometer von Siemens & Halske gehörigen) Galvanometer P für einen gewissen Bruchteil Ampere eine Ablenkung von einem Skalenteil hervorrief. Dieses Umaichen erfolgte mit Hilfe des Präzisionsamperemeters selber. Um die jeweiligen Ablesungen für das eingestellte Feld an dem 180 Skalenteile umfassenden Pyrometer innerhalb möglichst grosser Intervalle vornehmen und damit etwaige Ablesungsfehler auf ein Minimum herunterdrücken zu können, stellte ich mir nach Nachprüfung und eventueller Korrektion der schon von Rücker benutzten beiden Nebenschlüsse (mit I und IV bezeichnet) zwei weitere

II und III her, sodass ich über folgende Anwendungsbereiche meiner vier Nebenschlüsse verfügen konnte:

1 Skalenteil ist äquivalent bei

I	II	III	IV
$^1/_{1000}$ Amp.	$^1/_{360}$ Amp.	$^1/_{180}$ Amp.	$^1/_{100}$ Amp.

Maximale damit messbare Ampere:

0,18	0,5	1,0	1,8

Entsprechende maximale Feldstärken in Gauss:

ca. 2,3	ca. 6,4	ca. 12,8	ca. 23,0

Praktisch verfuhr ich dann in der Weise, dass ich benutzte

Nebenschluss	I	für Felder von		0	bis	2,3	Gauss
„	II	„	„	2,3	„	6,4	„
„	III	„	„	6,4	„	12,8	„
„	IV	„	„	12,8	„	23,0	„

Das Wenden der primären Stromrichtung endlich erfolgte mit Hilfe des Viernapfes V_1.

Der Ring R selbst hing zum Schutz gegen Erschütterungen mit starken Gummifäden an einem geeigneten Holzgestell in einem Petroleumbade. R_I sei schematisch seine primäre, R_{II} seine sekundäre Wicklung.

2. Sekundärkreis.

Zur Messung der Elektrizitätsmenge, die durch Veränderung der innerhalb der Sekundärspule vorhandenen Kraftlinienzahl in dieser ins Fliessen gebracht wird, diente das schon erwähnte Deprez-d'Arsonval-Galvanometer von Edelmann. Die Elongationsdauer betrug bei der gewählten und immer festgehaltenen Dämpfung

6,2 sek.

Fernrohr und Millimeterskala standen vom Spiegel etwa 4,5 m entfernt.

Der Viernapf V_2 ermöglichte es, die Ausschläge des Galvanometers immer nach derselben Seite der Skala erfolgen zu lassen.

Die aus bifilar aufgewickeltem Kupferdraht hergestellten Vorschaltwiderstände X_1 und X_2 dienten in Verbindung mit je zwei geeigneten Nebenschlusswiderständen, repräsentiert durch entsprechende Widerstandsspulen des Kurbelrheostaten K und des Universalwiderstandes U, dazu, bei konstant gehaltener Dämpfung die Empfindlichkeit des Galvanometers auf $^1/_{10}$ bezw. $^1/_{100}$ ihres ursprünglichen Wertes herabzusetzen.[1])

Die induzierte elektromotorische Kraft wurde auf absolutes Mass zurückgeführt durch Beziehung auf die durch einen kleinen Magnetinduktor J bewirkten Ausschläge, der seinerseits wieder vorgängig auf die mit Hilfe des Erdinduktors von Wilhelm Weber leicht einstellbare Vertikalkomponente des Erdmagnetismus geaicht war. Als Mittel aus zahlreichen Beobachtungen ergab sich für die beim Abziehen der Spule des Magnetinduktors induzierte elektromotorische Kraft in absoluten Einheiten der Wert

30 650.

Durch vorübergehende Kurzschliessung des Galvanometers vermittels des Viernapfes V_3 konnte eine schnellere Dämpfung erzielt und damit ein rascheres Arbeiten ermöglicht werden.

W ist eine Pohl'sche Wippe und R'_{II} ein der sekundären Ringwicklung äquivalenter Widerstand. Diese Anordnung wurde mit Rücksicht auf spätere eventuelle Nachwirkungsbeobachtungen gleich von vornherein getroffen, um eine Umrechnung und Neuanfertigung der Volkmann'schen Vorschalt- und Nebenschlusswiderstände zu umgehen.

Um die die Beobachtungen ausserordentlich störenden Thermoströme nach Möglichkeit zu vermeiden, wurden sämtliche Rheostate und Klemmen des Sekundärkreises, insbesondere die Viernäpfe, sorgfältig in Watte eingepackt und eventuell in geeigneten Holzkistchen untergebracht.

1) Über Theorie u. Berechnung vergl. W. Volkmann. Nebenschlusskasten zum Drehspulengalvanometer. Drud. Ann. Bd. 10. 1903. Seite 217.

IV. Formeln zur Berechnung von $\mathfrak{H}$ und $\mathfrak{B}$.

Wenn

N die Gesamtwindungszahl der Primärspule,

r den Radius des Leitkreises und

i die Stromstärke in Amp. bedeutet,

so ist die Feldstärke $\mathfrak{H}$ in Gauss gegeben durch die Beziehung

$$(1) \qquad \mathfrak{H} = \frac{0{,}2 \cdot N \cdot i}{r}.$$

Anderseits ist die magnetische Induktion $\mathfrak{B}$ in absoluten Einheiten allgemein:

$$(2) \qquad \mathfrak{B} = \frac{e}{Q_1 \cdot \beta \cdot \mathfrak{N}} \cdot \Sigma\, \alpha - \frac{Q_2}{Q_1} \cdot \mathfrak{H}.$$

Hierin ist

e die durch den Magnetinduktor J induzierte elektromotorische Kraft in absolutem Mass (= 30 650),[1])

β der durch dieses e bewirkte Galvanometerausschlag in Skalenteilen,

Q_1 der metallische Ringquerschnitt,

Q_2 der Querschnitt von innerhalb der Sekundärspule etwa ausserdem noch vorhandener, unmagnetisierbarer Substanz,

$\mathfrak{N}$ die Windungszahl der Sekundärspule,

$\Sigma\, \alpha$ die Summe aller vorangegangenen Galvanometerausschläge in Skalenteilen.

V. Der massive Nickelring.

Die Daten, gewonnen teils durch Wägen, teils durch Ausmessen auf der Teilmaschine und Reduktion der so erhaltenen Masse auf ein in der Normalaichungskommission geprüftes Normalmeter, sind:

1) Vergl. Seite 17.

Dicke senkrecht zur Ringebene . . . . . $6{,}422_3$ mm
Dicke in der Ringebene . . . . . $6{,}424_3$ mm
Mittlere Dicke: $2\,\varrho = 6{,}423_3$ mm.
Mittl. Radius des ringförmigen Querschnitts $\varrho = 3{,}211_6$ mm
Hieraus (also durch Messung) Querschnitt $Q'_1 = 0{,}324_0$ qcm
Anderseits (aus Masse, Dichte und Radius des Leitkreises errechnet) $Q''_1 \;\; . = 0{,}323_2$ qcm
Mittelwert $Q_1 = 0{,}323_6$ qcm.

Axendurchmesser

$$2\,(r_i + \varrho) = 2 \cdot (53{,}488_7 + 3{,}211_6)\text{ mm}$$
$$= 11{,}340\text{ cm}.$$

Absolutgewicht des Ringes (reduz.) 102,083 gr.
Spezifisches Gewicht (reduz.) $8{,}866_4$.

Auf dem zwecks besserer Isolation mit einem dünnen Schellacküberzug (aufgetragen in spirituöser Lösung) versehenen Ringe liegen zunächst die Sekundärwicklungen aus 0,5 mm starkem, doppeltseidenumsponnenen Kupferdraht in einer Lage.

Sekundäre Windungszahl

$$\mathfrak{N} = 594.$$

Um eine gute Isolation der Sekundärspule gegen die Primärspule zu erzielen, kam nun wiederum eine (diesmal stärkere) Schellackschicht, die nach dem Trocknen noch mit japanischem Seidenpapier umwickelt wurde. Erst dann folgten die Primärwindungen aus 1 mm starkem, gewachsten Draht in zwei Lagen.

Die dergestalt gewährleistete Isolation war eine ganz vorzügliche; der Widerstand der sekundären Lage gegen die primären war von der Grössenordnung[1])

40 Millionen Ohm.

Nach Fertigstellung der ersten Lage der Primärwicklung fixierte ich dieselbe durch Ausfüllen der Zwischenräume, die sich ja notwendigerweise auf der Aussenseite des Ringes befinden, mit flüssig aufgetragenem Paraffin. Durch diese

1) Bestimmt nach F. Kohlrausch. Lehrbuch der prakt. Physik. 10. Aufl. 1905. Seite 427. Abschnitt 94a, Absatz 2.

Operation wurde eine gleichmässigere Herstellung der zweiten Lage ermöglicht, allerdings erst, nachdem ich die glatte Paraffinoberfläche durch Umwickeln mit Seidenband beseitigt hatte. Die Windungszahlen der Primärwicklung sind:

Innere Lage	183
Äussere Lage	181
Insgesamt:	N = 364.

Da sich, wie erwähnt, die Sekundärspule direkt an den Ring anschmiegt, man ausserdem die gegenüber dem metallischen Querschnitt nur geringe Dicke der sekundären Bespinnung vernachlässigen kann, so fällt in dem Ausdruck für $\mathfrak{B}$ der zweite Term fort, sodass einfach bleibt:

$$\mathfrak{B} = \frac{e}{Q \cdot \beta \cdot \mathfrak{N}} \cdot \Sigma \alpha \cdot$$

VI. Die Versuchsreihen.

Ich stellte für verschiedene Werte von $\mathfrak{H}$, zwischen 0 und dem nach Ewing[1]) etwa zum Maximum der Permeabilität gehörigen 9,5 gelegen, für die Stufenzahlen

24, 12, 6, 3, 1

in der bekannten Weise Versuchsreihen an, die ich für dieselbe Feldstärke jeweilig unter dem Ausdruck „Feldreihen" zusammenfassen will, während ich die darunter fallenden je fünf Glieder (für verschiedene Stufenzahlen) kurz als „Stufenreihen" bezeichne.

Bei der grossen Anzahl meiner Stufenreihen (insgesamt 38) muss ich davon Abstand nehmen, die einzelnen Beobachtungsdaten mitzuteilen. Ich kann mich auch nicht darauf einlassen, all' die mittels der obenstehenden Formeln

1) Ewing. Magnetische Induktion in Eisen und verwandten Metallen. Deutsche Ausg. von Holborn und Lindeck. 1892. Seite 87.

aus den direkten Beobachtungen errechneten Ergebnisse in Tabellenform wiederzugeben.[1]) Ebenso habe ich auf die Beigabe der zugehörigen Hysteresiskurven verzichtet, einmal, weil ich einen für den Druck viel zu grossen Massstab hätte wählen müssen, sollten die tatsächlich beobachteten Unregelmässigkeiten überhaupt zutage treten, dann aber hauptsächlich aus dem Grunde, weil die so erhaltenen Kurven für die verschiedenen Felder gar nichts wesentlich Verschiedenes aufgezeigt hätten. Ich bemerke jedoch, dass ich für die meisten meiner Feldreihen die Hysteresisschleifen in möglichst grossem Massstabe tatsächlich gezeichnet habe. Sie verlaufen ausnahmslos schön regelmässig und schliessen sich mit grosser Genauigkeit. Dabei muss ich indessen noch eins hervorheben:

Auch hier beim Nickel zeigte sich, und zwar sehr deutlich, die von Gustav Wiedemann[2]) entdeckte und von Tomlinson[3]) weiter untersuchte sog. „molekulare Akkomodation". Danach erscheint die Hysteresisschleife nicht schon ohne Weiteres beim ersten Umlauf geschlossen, sondern erst nach mehrfacher Wiederholung des Kreisprozesses. Ich trug dieser Tatsache Rechnung, indem ich wie Rücker[4]) „bei meinen Beobachtungen . . . in dem durch folgende Zeichen

$$0 \rightarrow + \mathfrak{H}_{max} \rightarrow 0 \rightarrow - \mathfrak{H}_{max} \rightarrow 0 \rightarrow + \mathfrak{H}_{max} \rightarrow 0 \rightarrow - \mathfrak{H}_{max}$$

angedeuteten Magnetisierungsprozesse zwar alle Ablesungen notierte, jedoch nur die auf den unterstrichenen Teil sich

---

1) Um jedoch wenigstens eine Anschauung zu geben von der Art der Verwendung des vorliegenden Materials, habe ich die zu den Stufenreihen der Feldreihe 5,0 gehörenden Tabellen beigefügt. Siehe Seite 22 ff. Über die Bedeutung der einzelnen Angaben vergl. die weiteren Ausführungen.

2) G. Wiedemann. Die Lehre von der Elektrizität. 2. Aufl. 1895. Bd. 3. Seite 491.

3) H. Tomlinson. Proc. Roy. Soc. London. 47, 13. 1889. Entnommen aus G. Wiedemann. l. c. Seite 492.

4) F. Rücker. l. c. Seite 10.

Tabelle. (Anfang.) $\mathfrak{H}_{max}$

24 Stufen			12 Stufen		
$\mathfrak{B}'$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}'$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$
— 502,7	**— 493,4**	**— 5,007**	**— 516,0**	**— 503,4**	**— 4,995**
	Kommu	tierung	von V_2.		
— 494,1	— 484,8	— 4,848			
— 485,3	— 476,0	— 4,660	— 498,4	— 485,8	— 4,645
— 476,4	— 467,1	— 4,487			
— 467,3	— 458,0	— 4,312	— 480,1	— 467,5	— 4,288
— 457,9	— 448,6	— 4.129			
— 448,3	— 439,0	— 3,955	— 461,0	— 448,4	— 3,943
— 438,6	— 429,3	— 3,749			
— 428,5	— 419,2	— 3,571	— 441,0	— 428,4	— 3,563
— 418,1	— 408,8	— 3,365			
— 407,6	— 398,3	— 3,183	— 419,9	— 407,3	— 3,170
— 396,8	— 387,5	— 2,971			
— 385,7	— 376,4	— 2,761	— 397,8	— 385,2	— 2,745
— 374,2	— 364,9	— 2,553			
— 362,4	— 353,1	— 2,338	— 374,0	— 361,4	— 2,334
— 350,3	— 341,0	— 2,148			
— 337,8	— 328,5	— 1,920	— 349,0	— 336,4	— 1,911
— 324,8	— 315,5	— 1,692			
— 311,4	— 302,1	— 1,470	— 322,3	— 309,7	— 1,450
— 297,5	— 288,2	— 1,251			
— 283,2	— 273,9	— 1,007	— 293,7	— 281,1	— 1,003
— 268,3	— 259,0	— 0,764			
— 252,8	— 243,5	— 0,520	— 262,7	— 250,1	— 0,514
— 236,6	— 227,3	— 0,270			
— 219,8	**— 210,5**	**— 0,000**	**— 229,1**	**— 216,5**	**— 0,000**
	Kommu	tierung	von V_1.		
— 202,5	— 193,2	+ 0,270			
— 185,0	— 175,7	+ 0,520	— 193,6	— 181,0	+ 0,514
— 167.3	— 158,0	+ 0,764			
— 149,4	— 140,1	+ 1,007	— 157,2	— 144,6	+ 1,003
— 131,3	— 122,0	+ 1,251			
— 112,7	— 103,4	+ 1,470	— 119,6	— 107,0	+ 1,450
— 93,7	— 84,4	+ 1,692			
— 73,3	— 64,0	+ 1,920	— 79,1	— 66,5	+ 1,911
52,6	— 43,3	+ 2,148			
— 30,8	— 21,5	+ 2,338	— 34,0	— 21,4	+ 2,334

ca. 5,0.

6 Stufen			3 Stufen			1 Stufe		
$\mathfrak{B}'$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}'$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}'$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$
— 514,1	**— 508,1**	**— 4,995** Kom	**— 523,0** mu	**— 518,2** tier	**— 4,995** ung	**— 531,9** von V_2.	**— 524,0**	**— 4,995**
— 478,6	— 472,6	— 4,282						
— 440,1	— 434,1	— 3,567	— 447,7	— 442,9	— 3,560			
— 397,1	— 391,1	— 2,752						
— 349,4	— 343,4	— 1,913	— 355,1	— 350,3	— 1,911			
— 293,9	— 287,9	— 1,005						
— 229,1	**— 223,1**	**— 0,000** Kom	**— 234,0** mu	**— 229,2** tier	**— 0,000** ung	**— 241,4** von V_1.	**— 233,5**	**— 0,000**
— 157,3	— 151,3	+ 1,005						
— 79,2	— 73,2	+ 1,913	— 82,3	— 77,5	+ 1,911			

Tabelle. (Fortsetzung.)

24 Stufen			12 Stufen		
$\mathfrak{B}'$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}'$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$
— 6,4	+ 2,9	+ 2,553			
+ 19,2	+ 28,5	+ 2,761	+ 16,3	+ 28,9	+ 2,745
+ 45,7	+ 55,0	+ 2,971			
+ 74,7	+ 84,0	+ 3,183	+ 74,1	+ 86,7	+ 3,170
+ 106,2	+ 115,5	+ 3,365			
+ 142,4	+ 151,7	+ 3,571	+ 144,4	+ 157,0	+ 3,563
+ 183,0	+ 192,3	+ 3,749			
+ 228,0	+ 237,3	+ 3,955	+ 233,2	+ 245,8	+ 3,943
+ 276,4	+ 285,7	+ 4,129			
+ 325,7	+ 335,0	+ 4,312	+ 333,8	+ 346,4	+ 4,288
+ 372,5	+ 381,8	+ 4,487			
+ 413,8	+ 423,1	+ 4,660	+ 422,7	+ 435,3	+ 4,645
+ 450,7	+ 460,0	+ 4,848			
+ 483,5	**+ 492,8**	**+ 5,007**	**+ 491,8**	**+ 504,4**	**+ 4,995**
	Kommu	tierung	von V_2.		
+ 475,0	+ 484,3	+ 4,848			
+ 466,3	+ 475,6	+ 4,660	+ 474,3	+ 486,9	+ 4,645
+ 457,4	+ 466,7	+ 4,487			
+ 448,3	+ 457,6	+ 4,312	+ 456,0	+ 468,6	+ 4,288
+ 438,9	+ 448,2	+ 4,129			
+ 429,4	+ 438,7	+ 3,955	+ 436,9	+ 449,5	+ 3,943
+ 419,6	+ 428,9	+ 3,749			
+ 409,7	+ 419,0	+ 3,571	+ 417,0	+ 429,6	+ 3,563
+ 399,4	+ 408,7	+ 3,365			
+ 388,9	+ 398,2	+ 3,183	+ 396,0	+ 408,6	+ 3,170
+ 378,2	+ 387,5	+ 2,971			
+ 367,1	+ 376,4	+ 2,761	+ 373,8	+ 386,4	+ 2,745
+ 355,7	+ 365,0	+ 2,553			
+ 344,0	+ 353,3	+ 2,338	+ 350,3	+ 362,9	+ 2,334
+ 331,9	+ 341,2	+ 2,148			
+ 319,5	+ 328,8	+ 1,920	+ 325,2	+ 337,8	+ 1,911
+ 306,6	+ 315,9	+ 1,692			
+ 293,3	+ 302,6	+ 1,470	+ 298,6	+ 311,2	+ 1,450
+ 279,5	+ 288,8	+ 1,251			
+ 265,4	+ 274,7	+ 1,007	+ 270,0	+ 282,6	+ 1,003
+ 250,5	+ 259,8	+ 0,764			
+ 235,1	+ 244,4	+ 0,520	+ 239,2	+ 251,8	+ 0,514

6 Stufen			3 Stufen			1 Stufe		
$\mathfrak{B}'$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}'$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}'$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$
+ 16,3	+ 22,3	+ 2,752						
+ 145,5	+ 151,5	+ 3,567	+ 146,9	+ 151,7	+ 3,560			
+ 336,4	+ 342,4	+ 4,282						
+ 503,0	**+ 509,0**	**+ 4,995** Kom	**+ 510,5** mu	**+ 515,3** tier	**+ 4,995** ung	**+ 515,3** von V_2	**+ 523,2**	**+ 4,995**
+ 467,5	+ 473,5	+ 4,282	+ 435,9	+ 440,7	+ 3,560			
+ 428,6	+ 434,6	+ 3,567						
+ 385,7	+ 391,7	+ 2,752						
+ 337,6	+ 343,6	+ 1,913	+ 343,6	+ 348,4	+ 1,911			
+ 282,8	+ 288,8	+ 1,001						

Tabelle. (Schluss.)

24 Stufen			12 Stufen		
$\mathfrak{B}'$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}'$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$
+ 219,1	+ 228,4	+ 0,270			
+ 202,3	**+ 211,6**	**0,000**	**+ 205,7**	**+ 218,3**	**0,000**
	Kommu	tierung	von V_1.		
+ 185,1	+ 194,4	— 0,270			
+ 167,9	+ 177,2	— 0,520	+ 170,5	+ 183,1	— 0,514
+ 150,5	+ 159,8	— 0,764			
+ 132,8	+ 142,1	— 1,007	+ 134,5	+ 147,1	— 1,003
+ 114,8	+ 124,1	— 1,251			
+ 96,7	+ 106,0	— 1,470	+ 97,5	+ 110,1	— 1,450
+ 77,9	+ 87,2	— 1,692			
+ 58,7	+ 68,0	— 1,920	+ 58,5	+ 71,1	— 1,911
+ 38,9	+ 48,2	— 2,148			
+ 18,3	+ 27,6	— 2,338	+ 16,8	+ 29,4	— 2,334
— 3,7	+ 5,6	— 2,553			
— 26,9	— 17,6	— 2,761	— 29,7	— 17,1	— 2,745
— 51,9	— 42,6	— 2,971			
— 78,7	— 69,4	— 3,183	— 83,9	— 71,3	— 3,170
— 108,4	— 99,1	— 3,365			
— 141,4	— 132,1	— 3,571	— 149,1	— 136,5	— 3,563
— 178,8	— 169,5	— 3,749			
— 220,2	— 210,9	— 3,955	— 233,7	— 221,1	— 3,943
— 265,3	— 256,0	— 4,129			
— 312,4	— 303,1	— 4,312	— 336,6	— 324,0	— 4 288
— 360,9	— 351,6	— 4,487			
— 409,0	— 399,7	— 4,660	— 438,4	— 425,8	— 4,645
— 456,1	— 446.8	— 4,848			
— 501,6	**— 492,3**	**— 5,007**	**— 517,8**	**— 505,2**	**— 4,995**
Korr.: $\pm$ 9,3			Korr.: $\pm$ 12,6		
$\mathfrak{B}_{max_{24}} = 492{,}825$			$\mathfrak{B}_{max_{12}} = 504{,}35$		
$\mu_{24} = 98{,}43$			$\mu_{12} = 100{,}97$		

6 Stufen			3 Stufen			1 Stufe		
$\mathfrak{B}'$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{h}$	$\mathfrak{B}'$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{h}$	$\mathfrak{B}'$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{h}$
+ 218,7	+ 224,7	0,000	+ 223,7	+ 228,5	0,000	+ 226,3	+ 234,2	0,000
		Kom	mu	tier	ung	von V_1.		
+ 146,9	+ 152,9	— 1,005						
+ 70,3	+ 76,3	— 1,913	+ 73,5	+ 78,3	— 1,911			
— 18,9	— 12,9	— 2,752						
— 140,6	— 134,6	— 3,567	— 141,4	— 136,6	— 3,560			
— 331,3	— 325,6	— 4,282						
— 515,9	— 509,9	— 4,995	— 517,1	— 512,3	— 4,995	— 530,4	— 522,5	— 4,995
Korr.: ± 6,0			Korr.: ± 4,8			Korr.: ± 7,9		
$\mathfrak{B}_{max_6} = 509{,}00$			$\mathfrak{B}_{max_3} = 515{,}28$			$\mathfrak{B}_{max_1} = 523{,}23$		
$\mu_6 = 101{,}90$			$\mu_3 = 103{,}16$			$\mu_1 = 104{,}75$		

beziehenden verwertete.“ Erst unter Beachtung dieser Massregel schlossen sich die erhaltenen Kurven wirklich.

Die Ausschläge β bestimmte ich je drei- bis fünfmal unmittelbar vor Beginn und nach Beendigung der eigentlichen Stufenreihe. Aus beiden so erhaltenen, übrigens nur wenig von einander abweichenden Mittelwerten nahm ich wiederum das Mittel.

Für die nach Einstellung der betreffenden Stromstärke erforderliche Herbeiführung des unmagnetischen Anfangszustandes hat sich mir folgendes Entmagnetisierungsverfahren als das beste erwiesen:[1])

Ich schickte Wechselstrom von zunächst bis etwa 1,8 Amp. (am Amperemeter A abgelesen) wachsender, dann ganz allmählich bis 0 wieder abnehmender Intensität durch die Primärwicklung des Ringes R. Der Strom wurde mir geliefert durch die mit Stadtleitung (220 Volt) und Elektromotor angetriebene grosse Dynamomaschine des Instituts. Ich liess dieselbe angehen, nachdem mit Hilfe des technischen Widerstandes W_1 40 Ohm eingeschaltet und der Schieberheostat W_2 mittels des einfachen Quecksilberbügels B kurzgeschlossen war. Die elektromotorische Kraft steigerte ich bis zu etwa 70—75 Volt. Alsdann liess ich sie unter Zuhilfenahme des Spannungsregulators langsam abnehmen, entfernte schliesslich den Bügel B und schaltete in W_2 allmählich 1080 Ohm ein.

Erfahrungsgemäss lässt sich aber auch mit Hilfe dieser vollkommenen Einrichtung keine absolute Entfernung des remanenten Magnetismus erreichen, wenngleich immerhin nur minimale Spuren zurückbleiben und die Hysteresiskurve in Bezug auf die horizontale Axe unsymmetrisch erscheinen lassen. Auch diesen trug ich in zweckentsprechender Weise Rechnung:

Die Beobachtung[2]) liefert drei zur Verwertung gelangende Grössen für die maximale Induktion:

1) Vergl. hierzu Figur 2.
2) Vergl. Seite 21.

(1) $-\mathfrak{B}'_{max'}$,

(2) $+\mathfrak{B}'_{max}$

(infolge unvollständiger Entmagnetisierung etwas verschieden von $-\mathfrak{B}'_{max'}$),

(3) $-\mathfrak{B}'_{max''}$

(bei vollkommen geschlossener Kurve identisch mit $-\mathfrak{B}'_{max'}$).

$-\mathfrak{B}'_{max'}$ und $-\mathfrak{B}'_{max''}$ geben den Mittelwert

$$-\mathfrak{B}'_{max};$$

dieser wiederum mit $+\mathfrak{B}'_{max}$ kombiniert gibt

$$\pm\mathfrak{B}'_{max}$$

oder kurz $\mathfrak{B}'_{max}$.

Alle drei beobachteten Maximalwerte von $\mathfrak{B}$ werden ebenso wie die zwischen 0 und $\mathfrak{B}'_{max}$ liegenden Beobachtungswerte nach Massgabe dieses errechneten $\mathfrak{B}'_{max}$ korrigiert.[1])

Aber auch das so bei irgend einer Stufenzahl erhaltene $\mathfrak{B}'_{max}$ kann noch nicht ohne Weiteres in Vergleich gesetzt werden zu dem einer anderen Stufenreihe innerhalb derselben Feldreihe angehörenden — theoretisch wohl, praktisch aber sind wenn auch minimale Abweichungen in den übrigens ebenso durch wiederholte Mittelbildung gewonnenen zugehörigen $\mathfrak{H}_{max}$ unvermeidlich, unter anderem schon wegen der durch die Anwesenheit des Beobachters, durch die Skalenbeleuchtung u. s. w. innerhalb längerer Zeiträume verursachten geringen Temperaturschwankungen. Es muss sonach das dem betreffenden $\mathfrak{H}_{max}$ korrespondierende $\mathfrak{B}'_{max}$ noch auf ein aus sämtlichen $\mathfrak{H}_{max}$ der betreffenden Feldreihe gewonnenes mittleres $\mathfrak{H}_{max}$ reduziert werden. Unter

1) Über den Betrag dieser Unsymmetrie vergl. die Tabelle S. 26 u. 27 unten. Ich möchte jedoch nicht unterlassen zu bemerken, dass dieselbe fast auf 0 herabsank, nachdem in den Weihnachtsferien 1907/08, als der grösste Teil der hierher gehörigen Beobachtungen bereits erledigt war, die Kupferbürsten der Dynamomaschine durch Kohlenabnehmer ersetzt worden waren.

der Voraussetzung, dass die Permeabilität μ bei den doch geringfügigen Differenzen zwischen den tatsächlichen Feldstärken und der mittleren merklich konstant bleibt, geschieht dies vermöge der Relation:

$$\frac{\mathfrak{B}'_{max}}{\mathfrak{H}_{max}} = \mu = \frac{\text{reduziertes } \mathfrak{B}_{max}}{\text{mittleres } \mathfrak{H}_{max}}$$

$$\text{reduziertes } \mathfrak{B}_{max}{}^{1}) = \mu \cdot \text{mittleres } \mathfrak{H}_{max}.$$

Die bei den verschiedenen Stufenzahlen

24, 12, 6, 3, 1

auftretenden Anomalieen werden in der Tat am besten charakterisiert durch die Unterschiede in den auf diese Weise gewonnenen zugehörigen Maximalwerten der Induktion

$$\mathfrak{B}_{max_{24}}, \quad \mathfrak{B}_{max_{12}}, \quad \mathfrak{B}_{max_{6}}, \quad \mathfrak{B}_{max_{3}}, \quad \mathfrak{B}_{max_{1}}.$$

Die Remanenz variiert in ganz ähnlicher Weise, während die auf der symmetrisch gezogenen $\mathfrak{H}$-Axe abgemessene Koërzitivkraft in allen Fällen mit grosser Genauigkeit die nämliche bleibt.

VII. Ergebnisse.

So beschränke ich mich denn auf die tabellenmässige Wiedergabe der vorhin diskutierten errechneten Grössen, ohne dass ich den einzelnen Feldreihen etwas Besonderes beizugeben hätte.

Erwähnt sei nur noch, dass die Reihen nicht in der hier aufgeführten Folge (nach wachsendem $\mathfrak{H}$ geordnet) durchgeführt wurden. Da es sich um nicht ohne Weiteres vorauszusehende Tatsachen handelt, konnte ich nicht von vornherein in dieser systematischen Weise vorgehen, sondern war zunächst aufs Umhertasten angewiesen. Ich verfuhr gewöhnlich so, dass ich nach dem Einstellen eines neuen

1) Siehe die Tabellen.

Feldes zuerst nur die weniger zeitraubenden 1-, 3- und 6-Stufenreihen vornahm. Ergab sich dann nichts prinzipiell Neues gegenüber den bisherigen Beobachtungen, so wurde von der weiteren Ergänzung der betreffenden Feldreihe Abstand genommen. Im anderen Falle folgten die 12- und die 24-Stufenreihe.

Die wirkliche Versuchsfolge habe ich hinter den laufenden Nummern in Klammern angegeben.[1])

$\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 0,5.

Tabelle 1. (9)

Stufen	$\mathfrak{H}_{max}$	$\mathfrak{B}'_{max}$	μ	mittleres $\mathfrak{H}_{max}$	reduziert. $\mathfrak{B}_{max}$	% Diff.
3	0,5020	25,625	51,04	0,5014	25,593	— 0,5
1	0,5007	25,688	51,30		25,722	—

$\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 1,5.

Tabelle 2. (8)

6	1,499	79,86	53,28	1,499	79,86	1,2
3		79,94	53,33		79,94	— 1,1
1		80,86	53,94		80,86	—

$\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 2,5.

Tabelle 3. (6)

12	2,482	144,38	58,18	2,4863	144,7	— 2,2
6	2,489	144,28	57,97		144,1	— 2,6
3	2,486	143,15	57,59		143,2	— 3,2
1	2,488	147,98	59,49		147,9	—

1) Unter der Kolumne „% Diff." sind die prozentualen Unterschiede verzeichnet, um die die betreffenden $\mathfrak{B}_{max}$ kleiner (daher das —) sind als $\mathfrak{B}_{max_1}$.

$\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 3,0.

Tabelle 4. (7)

Stufen	$\mathfrak{H}_{max}$	$\mathfrak{B}'_{max}$	μ	mittleres $\mathfrak{H}_{max}$	reduziert. $\mathfrak{B}_{max}$	% Diff.
12	3,002	184,0	61,29	2,9925	183,4	— 2,2
6	2,991	184,0	61,53		184,1	— 1,8
3	2,989	186,0	62,23		186,2	— 0,7
1	2,988	187,2	62,66		187,5	—

$\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 3,5.

Tabelle 5. (4)

24	3,493	229,75	65,78	3,4998	230,21	— 4,8
12	3,500	234,00	66,85		233,97	— 3,2
6	3,501	236,45	67,55		236,40	— 2,2
3	3,504	239,83	68,44		239,53	— 1,0
1	3,501	241,90	69,10		241,84	—

$\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 4,5.

Tabelle 6. (5)

24	4,497	384,05	85,40	4,501	384,40	— 4,9
12	4,510	390,95	86,69		390,17	— 3,5
6	4,499	395,25	87,85		395,43	— 2,2
3	4,499	400,68	89,06		400,85	— 0,8
1	4,501	404,28	89,82		404,28	—

$\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 5,0.

Tabelle 7. (2)

24	5,007	492,83	98,43	4,997	491,83	— 6,0
12	4,995	504,35	100,97		504,56	— 3,6
6	4,995	509,00	101,90		509,20	— 2,7
3	4,995	515,28	103,16		515,48	— 1,5
1	4,995	523,23	104,75		523,43	—

$\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 6,55.

Tabelle 8. (3)

Stufen	$\mathfrak{H}_{max}$	$\mathfrak{B}'_{max}$	μ	mittleres $\mathfrak{H}_{max}$	reduziert. $\mathfrak{B}_{max}$	% Diff.
24	6,55	936	142,8		935	— 5,8
12	6,55	960	146,6		960	— 3.3
6	6,53	967	148.1	6,548	970	— 2,3
3	6.54	979	149,8		981	— 1,2
1	6,57	996	151,6		993	—

$\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 9,5.

Tabelle 9. (1)

24	9,49	1926	203,0		1930	— 3,6
12	9,53	1966	206,4		1962	— 2,0
6	9,51	1981	208,3	9,509	1981	— 1,0
3	9,47	1978	208,9		1987	— 0,7
1	9,55	2011	210,5		2002	—

Um diese numerischen Ergebnisse anschaulich zu machen, bediente ich mich der graphischen Darstellung. In Figur 3 habe ich die Feldstärken $\mathfrak{H}$ in Gauss als Abscissen, die prozentualen Unterschiede in den $\mathfrak{B}_{max}$ als Ordinaten aufgetragen. Ich erhielt auf diese Weise mehrfach geschwungene und sogar wider Erwarten sich durchschneidende Kurven. Der korrespondierende, glatte Verlauf derselben zeigt, dass die Fehlerquellen nicht gross sein können.

Die eigentümliche Form der Kurven legte die Vermutung nahe, dass vielleicht mehrere die Abweichungen bedingende Ursachen wirksam sind. Es musste nun das Ziel der weiteren Untersuchungen sein, diese eventuellen Einflüsse durch geeignete Versuchsbedingungen von einander zu trennen und im Einzelnen klarzulegen.

VIII. Theoretische Erklärungsmöglichkeiten und ihre experimentelle Prüfung.

1. Wirbelströme.

Rücker[1]) kam zunächst auf den Gedanken, die auch von ihm bei Eisen und Stahl beobachteten Unterschiede in der Maximalinduktion bei verschiedener Stufenzahl könnten mit den in massiven Metallmassen entstehenden Wirbelströmen in ursächlichem Zusammenhang stehen. Er suchte diese Wirbelströme in üblicher Weise durch Massenzerteilung unschädlich zu machen, indem er den massiven Ringen in den Grössenverhältnissen ähnliche Drahtringe verfertigte und diese untersuchte. Er gelangte zu dem Resultat, dass „sich trotzdem auch hier erhebliche Unterschiede in der Maximalinduktion bei verschiedener Stufenzahl zeigen. Die Wirbelströme könnten daher auf diese Erscheinung höchstens einen geringen Einfluss ausüben".[2]) Zur Erhärtung dieser Schlussfolgerung zieht er die Versuche von F. Kirstädter[3]) und M. Wien[4]) heran, wonach „der Einfluss der Wirbelströme bei der Magnetisierung überhaupt nur gering sei".

Ganz abgesehen davon, dass die Verhältnisse beim Nickel möglicherweise anders liegen könnten, nahm ich vor allem daran Anstoss, dass Rücker innerhalb der der meinen korrespondierenden Abhängigkeitszone (zwischen 0 und maximaler Permeabilität) nur 2 bis höchstens 3 Beobachtungsreihen angestellt hatte, da er anfangs ebenso wie seine Vorgänger in dem Vorurteil befangen gewesen war, er könne eine Abhängigkeit von der Feldstärke feststellen. Da nun die Möglichkeit vorlag, die eigentümlichen Ausbuchtungen meiner Kurven mehreren verschiedenen Einwirkungen zuzu-

1) F. Rücker. l. c. Seite 57.

2) F. Rücker. l. c. Seite 65.

3) F. Kirstädter. Zur Magnetisierung eiserner Hohl- und Vollringe. Wied. Ann. Band 65. 1898. Seite 85.

4) M. Wien. l. c.

schreiben, so war es gar nicht von der Hand zu weisen, dass Rücker in dem kritischen maximalen Wirkungsbereich der Wirbelströme vielleicht zufällig gar keine Beobachtungen gemacht hatte. Ausserdem liessen ja er sowohl als auch Kirstädter und Wien die Möglichkeit wenigstens eines geringen Einflusses offen.

So folgte ich denn dem Vorgehen von Rücker und fertigte mir auf der Drehbank aus etwa 0,2 mm starkem Nickeldraht einen meinem massiven Ring in den massgebenden Grössenverhältnissen entsprechenden Drahtring. Den rechteckigen Querschnitt durchsetzten 740 Drähte. Die feste Formgebung wurde erzielt durch Einbetten der einzelnen Windungen in erwärmtes Pizeïn. (Schellack erwies sich als hierzu wenig geeignet, da er zu schnell erhärtete.) Das Pizeïn diente zugleich zur Isolation der Drähte gegen einander. Zwecks noch besserer Isolierung war der Draht vor dem Aufwickeln mit einem in spirituöser Lösung aufgetragenen Schellacküberzug versehen worden. Der metallische Querschnitt entsprach genau dem des massiven Ringes; der Radius des Leitkreises war nur wenig verschieden von dem anderen. Die Primär- und die Sekundärspule wurden ganz in der beim massiven Ring angegebenen Weise hergestellt.

Daten des Drahtringes:

Kantenlängen des rechteckigen Querschnitts:

$$a = 10{,}448 \text{ mm}$$
$$b = 6{,}544 \text{ mm}$$

Gesamtquerschnitt $a \cdot b = 0{,}683_7$ qcm

Metallischer Querschnitt $Q_1 = 0{,}323_6$ qcm

Querschnitt des Zwischenmittels $Q_2 = 0{,}360_1$ qcm

Axendurchmesser $2 \cdot \left(r_i + \frac{b}{2}\right) = 2 \cdot (50{,}0 + 3{,}272)$ mm
$= 10{,}654_4$ cm

Spezifisches Gewicht $= 8{,}924_0$.

Primäre Windungszahl $N = 296$.

Sekundäre Windungszahl $\mathfrak{N} = 495$.

Bei der Untersuchung des Drahtringes stellten sich indessen ganz merkwürdige, vollkommen andere Verhältnisse

heraus. Unter dem Einfluss desselben Feldes nahm der Drahtring bei weitem weniger Magnetismus an als der massive Ring. Ich lasse zum Vergleich zwei Tabellen folgen:

$$\mathfrak{H}_{max} = \text{ca. } 5{,}0.$$

Tabelle 10.

Stufen	$\mathfrak{H}_{max}$	$\mathfrak{B}'_{max}$	μ	mittleres $\mathfrak{H}_{max}$	reduziert. $\mathfrak{B}_{max}$	% Diff.
6	5,01	58,403	11,66	5,01	58,403	— 0,4
1	5,01	58,665	11,71		58,665	—

$$\mathfrak{H}_{max} = \text{ca. } 10{,}0.$$

Tabelle 11.

6	9,98	118,60	11,88	9;97	118,48	— 1,0
1	9,96	119,55	12,00		119,67	—

$\mathfrak{B}_{max}$ sowohl als auch μ erreichen also hier beim Drahtring für dasselbe Feld $\mathfrak{H}_{max} = 5{,}0$ nur etwa $\frac{1}{9}$ des Betrages beim massiven Ring;[1]) für $\mathfrak{H}_{max} = 10{,}0$ gar ist das Zurückbleiben der beiden Grössen noch bedeutender (trotz des um 0,5 Gauss stärkeren Feldes beim Drahtring nahezu $\frac{1}{17}$!).[2]) Bemerkenswert ist ferner, dass die μ in dem Felde 10,0 gegenüber denen bei 5,0 nur um einen ganz geringen Betrag gesteigert erscheinen.

Eine Erklärung für diese auffallende Verschiebung der Verhältnisse dürfte in folgendem zu suchen sein:

Es ist bereits bekannt, dass mechanische Kräfte gerade beim Nickel eine ganz bedeutende Beeinflussung des magnetischen Verhaltens bewirken.[3]) Es zeigt sich z. B. nach

1) Siehe Seite 32 Tabelle 7.
2) Siehe Seite 33 Tabelle 9.
3) Ewing. l. c. Seite 184.

Ewing „eine ausserordentlich starke Verringerung der Suszeptibilität“ des Nickels, wenn man dasselbe magnetisiert, während es durch eine konstante Belastung im Zustande longitudinaler Dehnung erhalten wird. Dieser Fall lag offenbar hier vor: Der an sich sehr weiche Draht musste bei der Herstellung des Ringes auf der Drehbank straff gespannt werden, blieb nach dem Aufwickeln in diesem Zwangszustande und zeigte infolgedessen das gekennzeichnete Verhalten.[1])

Ausserdem kann noch eine andere Erklärung herangezogen werden. Nach Untersuchungen von Kahlbaum und E. Sturm[2]) tritt beim Nickel infolge Bearbeitung eine sehr bedeutende (bis zu 1 % gehende) Änderung der Dichte auf. Mit dem Vorgang des Drahtziehens, bei dem das Material durch immer kleiner und kleiner werdende Öffnungen gewaltsam hindurchgepresst wird, muss also eine einschneidende Veränderung im Metallgefüge verbunden sein — wie das in der Tat durch das festgestellte höhere spezifische Gewicht des Nickeldrahtes gegenüber dem massiven Nickel sich bestätigt findet.[3])

Da der Drahtring zu dem Zwecke verfertigt worden war, die Parallelerscheinungen zum massiven Ring unter Ausschaltung der bei diesem eventuell wirksamen Wirbelströme auftreten zu lassen, so war es also nutzlos, mit einem Material weiter zu arbeiten, das total veränderte magnetische Eigenschaften bekommen hatte, umsomehr, als (wegen der natürlich nicht gleichmässigen Dehnung) die Homogenität unbedingt verloren gegangen sein musste. Da sich aber derartige Veränderungen bei Anfertigung von Drahtringen gar nicht vermeiden lassen, so blieb nichts Anderes übrig, als auf das Studium des Einflusses der Wirbelströme überhaupt zu verzichten.

1) Die entsprechende Kurve zeigt jedoch einen durchaus regelmässigen Verlauf.

2) Zeitschr. f. anorg. Chemie. 1905. Seite 252.

3) Vergl. Seite 35 und 19.

2. Nachwirkung.

Ich schritt deshalb unverzüglich zur Untersuchung der magnetischen Nachwirkung oder Viskosität,[1]) die bei Rücker einen nicht unwesentlichen Einfluss ausgeübt hatte. Gibt er doch als eines seiner Hauptergebnisse an:[2]) „Die Viskosität kann bei ballistischen Messungen besonders in der Nähe des Maximums der Permeabilität erhebliche Fehler bewirken . . .“

Bei meinen Beobachtungen bediente ich mich zunächst des von Rücker[3]) angegebenen, etwas rohen Verfahrens. Die schon eingangs[4]) gelegentlich der Beschreibung der Versuchsanordnung erwähnte Pohl'sche Wippe war zunächst so gekippt, dass nicht die Sekundärwicklung des Ringes selbst, sondern der ihr äquivalente Widerstand R'_{II}[5]) in den Sekundärkreis eingeschaltet war. In diesem Zustande wurde der Strom variiert. Infolge der dadurch bedingten Veränderung der Kraftlinienzahl lief früher ein Induktionsstrom ab, der am Galvanometer gemessen wurde. Jetzt aber lief er durch den Äquivalentwiderstand und konnte so das Galvanometer nicht beeinflussen. Erst nach einer gewissen Zeit wurde die Wippe mit Hilfe einer in einer Führung gleitenden Holzschiene mit einem bügelförmigen Ansatz aus starkem Kupferdraht umgelegt und so der eigentliche Ring in den Sekundärkreis eingefügt. Traten von diesem Moment ab noch irgendwelche Änderungen in der magnetischen Verfassung des Ringes auf, so war es nunmehr möglich, dieselben am Galvanometer messend zu verfolgen.

---

1) Als „Viskosität“ bezeichnet man die Erscheinung, dass der magnetische Zustand der ihn hervorrufenden Kraft nicht momentan folgt, sondern dazu eine gewisse merkliche Zeit braucht. „Hysteresis“ nennt man im Unterschied davon das Zurückbleiben des magnetischen Zustandes überhaupt hinter dem ihn veranlassenden.

2) F. Rücker. l. c. Seite 105.

3) F. Rücker. l. c. Seite 75.

4) Siehe Seite 17.

5) Vergl. Figur 1.

Ich nahm das Umlegen der Wippe nach dem Takte eines Halbsekundenpendels je 1, 2, 3 . . . Sekunden nach Variierung des Primärstromes vor, erhielt jedoch durchweg nur Ausschläge von einigen Zehnteln eines Skalenteiles. Die Thermoströme verursachten trotz Beobachtung aller gebotenen Vorsichtsmassregeln weit grössere Elongationen. Ihr Einfluss wurde eliminiert, indem unmittelbar vor der eigentlichen Nachwirkungsbeobachtung die Wippe ohne Variierung des Stromes gekippt und der so erhaltene Thermoausschlag nachher in Abzug gebracht wurde.

Immerhin war das Vorhandensein einer wenn auch minimalen magnetischen Viskosität konstatiert, und ich versuchte deshalb, ihr mit verfeinerten Hilfsmitteln beizukommen. Ich traf die Schaltung so, dass das Edelmann'sche Drehspulengalvanometer, nachdem daran die absoluten Beträge der Änderung der Kraftlinienzahl festgestellt waren, durch einfaches Umlegen einer zweiten eingeschalteten Wippe durch ein Panzergalvanometer ersetzt wurde, vermittelst dessen dann die eigentliche Nachwirkung gemessen werden sollte. Diese Massnahme hatte den Erfolg, dass ich zwar nun merkliche, allerdings noch immer verhältnismässig geringe Elongationen erhielt, dass aber auch die Thermoströme sich im selben Grade gesteigert geltend machten. Zudem blieben die thermischen Einflüsse keineswegs auch nur annähernd konstant. Die Schwankungen erreichten vielmehr an dem empfindlichen Instrument Beträge, die die der Nachwirkung selbst noch übertrafen.

Es dürfte somit nach meinem Dafürhalten unmöglich sein, die angesichts der geringen Suszeptibilität des Nickels schon an sich kleinen Beträge der magnetischen Nachwirkung mit den vorhandenen Hilfsmitteln auf ballistischem Wege mit hinreichender Genauigkeit direkt zu messen. Auch der Versuch, die Viskosität mittels der unipolaren Methode an langen, dünnen Drähten festzustellen, würde meines Erachtens von keinem Erfolge begleitet sein, da die Nachwirkung bei

den geringen Dimensionen dieses Versuchsmaterials noch mehr zurücktreten wird.

Immerhin legte das äusserst schwächliche Auftreten der Viskosität beim Nickel im Gegensatz zu den von Rücker bei Eisen und Stahl beobachteten Erscheinungen eine Ergänzung nahe. Anscheinend trat die Nachwirkung auch beim Nickel auf, nur innerhalb viel kürzerer Zeitintervalle, sodass bisher nur die letzten Ausläufer der Messung zugänglich waren. Es kam also darauf an, eine andere Versuchsanordnung zu treffen, die an Stelle des nach subjektivem Ermessen erfolgenden Umlegens der Wippe die dabei erledigten Verrichtungen automatisch besorgte und ausserdem auch kürzere Zeiträume abzugrenzen gestattete. Dazu diente die bekannte Atwood'sche Fallmaschine mit entsprechenden Abänderungen.

Das aus einer gewissen, durch Ausprobieren festgestellten Höhe fallende Gewicht schloss zuerst vermittelst eines starken, als Übergewicht dienenden Bügels den Primärkreis, lief nach Abheben desselben mit gleichförmiger Geschwindigkeit weiter und schloss nach beliebiger Zeit durch einen zweiten, kürzeren aufliegenden Bügel den Sekundärkreis. Praktisch geschah das in der Weise, dass die Leitungsdrähte zu Quecksilberrinnen geführt wurden, die in Form von Kreisringsektoren (um bei fallendem Gewicht eventuellen, leicht eintretenden Verdrehungen der Schnur und damit der aufliegenden Bügel zu begegnen) in zwei in der Mitte kreisförmig ausgeschnittenen Paraffinplatten eingegraben waren. Der kürzere Sekundärbügel (zwecks Herstellung einer gleichförmigen Bewegung natürlich auf der anderen Seite des Fadens äquilibriert) ging durch den oberen, grösseren Ausschnitt unbehindert hindurch und lief weiter bis zum Einschlagen in die unteren Quecksilberrinnen. Das eigentliche Fallgewicht setzte seinen Weg durch den kleineren, unteren Ausschnitt fort und wurde schliesslich festgehalten. Ich arbeitete durchweg mit einer gleichförmigen Geschwindigkeit von 80 cm pro Sekunde, sodass zum Zurücklegen von 1 cm

Weg 0,0125 Sekunden nötig waren. Um die Thermoströme auf ein Minimum zu reduzieren, wurden sämtliche Beobachtungen im kalten Zimmer ausgeführt, ausserdem wurden zur Skalenbeleuchtung wie auch zu den Ablesungen am Amperemeter statt des Gasglühlichts Kerzen verwendet.

Die Bedienung der Fallmaschine übernahm in dankenswerter Weise Herr cand. phil. Martin Otto, während ich selbst am Fernrohr stand.

Da die beschriebene Vorrichtung nur die auf Stromschluss erfolgenden Vorgänge zu beobachten gestattete, beschränkte ich mich auf diese und verfuhr so: Nach dem Einstellen des betreffenden Feldes wurde der Ring entmagnetisiert, und sodann wurden zwei vollständige einstufige Kreisprozesse hintereinander vorgenommen, ohne dass die gemachten Ablesungen verwertet worden wären. Erst hierauf erfolgten immer an derselben Stelle der zyklischen Magnetisierung die eigentlichen Beobachtungen. Natürlich wurde auch hier unmittelbar vor dem Variieren des Primärstromes der Sekundärbügel bei noch geöffnetem Primärkreis eingetaucht und der so bestimmte Thermostrom hernach in Abzug gebracht.

Ich habe in dieser Weise in drei charakteristischen Feldern gearbeitet, nämlich für $\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 9,5, ca. 5,0 und ca. 2,5. Die nach Ablauf gewisser Zeitteilchen noch beobachteten Elongationen (in Skalenteilen bezw. mm) sind in folgender Tabelle zusammengestellt:

	$\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 9,5	ca. 5,0	ca. 2,5
Elong. nach 0,0000 sek.	8820	2198	384,7
„ „ 0,0375 „	588,0	236,9	1,4
„ „ 0,0500 „	88,6	129,0	0,9
„ „ 0,0625 „	33,6	45,0	— 0,1
„ „ 0,0750 „	18,2	14,8	+ 0,1
„ „ 0,0875 „	13,5	9,8	—
„ „ 0,1000 „	11,5	6,6	+ 0,2
„ „ 0,1125 „	8,8	5,1	—

Fortsetzung.	$\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 9,5	ca. 5,0	ca. 2,5
Elong. nach 0,1250 sek.	6,3	4,4	+ 0,2
„ „ 0,1500 „	5,9	3,5	0,0
„ „ 0,2000 „	5,5	3,5	— 0,2
„ „ 0,2500 „	5,0	3,3	—
„ „ 0,3000 „	4,6	3,1	—
„ „ 0,3750 „	4,2	3,1	—
„ „ 0,5000 „	3,1	—	—

Zwecks Veranschaulichung dieser Resultate entwarf ich die Figuren 4a, 4b und 4c.

Es sind hier als Abszissen die Zeiten in Sekunden, als Ordinaten die entsprechenden Elongationen in natürlicher Grösse aufgetragen. Leider konnten so nicht die Kurven in ihrem ganzen Umfange zur Darstellung gelangen.

Charakteristisch ist in allen 3 Fällen der plötzliche, ungemein starke Abfall und ein sich daran anschliessendes, sehr langsames Abklingen. Die Kurve a z. B. kommt aus einer Entfernung von 8,82 Metern her und hat sich der Abszissenaxe nach einer Zeit von nur 0,125 Sekunden bereits auf 6,3 mm angenähert; sie hat hier einen ziemlich scharfen Knick und senkt sich von da an ganz allmählich nach der Axe hin. Noch deutlicher zeigt sich die letztere Erscheinung bei Kurve b. Der Knick ist hier zwar nicht so scharf ausgebildet wie vorhin, aber, aus 2,2 Metern Entfernung herkommend, verläuft die Kurve nach 0,15 Sekunden fast der Axe parallel. Bei Kurve c ist die Intensität schon nach 0,0625 Sekunden auf den Nullwert herabgesunken. Die von da an noch beobachteten, bald positiven, bald negativen Elongationen liegen innerhalb der Fehlergrenze.

So zeigt sich denn in der Tat auch beim Nickel die Erscheinung der Viskosität, nur verläuft dieselbe hier innerhalb weit kürzerer Zeiten als bei Eisen und Stahl. Jedenfalls kann sie zur Erklärung der beobachteten Unterschiede in der Maximalinduktion bei verschiedener Stufenzahl angesichts ihrer minimalen Grösse kaum herangezogen werden.

3. Molekulare Trägheit.

Nachdem Rücker[1]) auch an langen, dünnen Drähten entsprechende magnetometrische Versuche angestellt hat, kommt er zu der Behauptung: „Es müssen . . . die verwendeten Materialien die Eigenschaft besitzen, dass ihr magnetischer Zustand bei hohen Werten der Permeabilität kleinen Änderungen der magnetisierenden Kraft nicht so folgen kann als grossen.“ Er stützt sich weiter auf andere Autoren und fährt fort: „Auch die Beobachtungen von Gumlich und Schmidt[2]) an dem Eisenellipsoid bei geringer Maximalfeldstärke (1,2) . . . können nur durch die Annahme einer solchen Eigenschaft erklärt werden; denn die Viskosität hätte am Magnetometer leicht und sicher festgestellt werden können. Zu einem gleichen Ergebnisse führten auch die analogen Untersuchungen von K. Honda und S. Shimizu[3]) mit intermittierenden Strömen verschiedener Frequenz.“

Sehr wahrscheinlich trifft diese Erklärung auch für Nickel zu — die beiden letztgenannten Autoren wenigstens geben ihre Resultate als auch für Nickeldrähte gültig an. Sie direkt zu beweisen ist mit Hilfe der ballistischen Methode nicht möglich. Es müsste hierzu notwendigerweise auf die magnetometrische Methode zurückgegriffen werden. Bei ihr treten sowohl Wirbelströme als auch Nachwirkung nicht in die Erscheinung bezw. können leicht eliminiert werden, und wenn sich auch hier Differenzen zwischen den Ergebnissen der demselben Felde zugehörenden Stufenreihen herausstellen, so dürfte eine andere als die Rücker'sche Annahme diese Tatsache kaum zu erklären vermögen.

Da indessen die Resultate nach der einen Methode, wie auch Rücker[4]) hervorhebt und womit er die ihm ge-

1) F. Rücker. l. c. Seite 104.

2) E. Gumlich und E. Schmidt. l. c.

3) K. Honda und S. Shimizu. Magnetisierung von Eisen-, Stahl- und Nickeldrähten durch intermittierenden Strom. Beibl. zu Drud. Ann. Bd. 26. 1902. Seite 104.

4) F. Rücker. l. c. Seite 8—9.

stellte Aufgabe überhaupt rechtfertigt, wegen des Einflusses der Gestalt des Versuchsobjektes auf den magnetischen Zustand nicht ohne Weiteres auf die nach anderer Methode für andere Gebilde gefundenen Verhältnisse übertragbar sind, so liessen auch etwaige magnetometrische Versuche mit dünnen Drähten keine Parallele zu. Das wäre beim Nickel um so weniger der Fall, als ja gerade dieses Metall, wie bereits mehrfach hervorgehoben, gegen Einflüsse mechanischer Natur in Bezug auf seine magnetischen Eigenschaften ausserordentlich empfindlich ist. Ich hätte also nur nachweisen können, dass die von mir kurz als „molekulare magnetische Trägheit" bezeichnete Erscheinung beim Nickel tatsächlich im Spiele ist — und diese Aufgabe war bereits von den beiden Japanern gelöst.

Die molekulare Trägheit wird demzufolge auch bei meinen ballistischen Messungen mitgewirkt haben; inwiefern sie auf die Gestalt meiner Abhängigkeitskurven von Einfluss gewesen ist, ist nicht zu entscheiden.

4. Molekularinduktionsströme.

Eine vierte theoretische Erklärungsmöglichkeit endlich gab mir ein Hinweis von Ewing[1]) an die Hand.

Gewisse Theorieen (W. Weber) fassen bekanntlich den Magnetisierungsvorgang als das Richten von präformierten Molekularmagneten auf. Man denkt sich ferner nach der Ampère'schen Theorie diese Molekularmagnete hervorgebracht durch molekulare Stromkreise. Wenn nun aber eine elektromagnetische Kraft in Wirksamkeit tritt, so dreht sie nicht nur die molekularen Stromkreise, sondern sie wird gleichzeitig sekundäre Ströme in ihnen induzieren, die sich über die primären Ströme lagern und sie im allgemeinen schwächen. Dieser Einfluss muss um so merklicher sein, je schwächer jene primären Molekularströme sind. In der Tat müssen dieselben beim Nickel vermöge seiner weit

1) Ewing. l. c. Seite 325—326.

geringeren Suszeptibilität als bedeutend schwächer angesehen werden als bei Eisen und Stahl, und möglicherweise könnte diese Tatsache zu besonderen Erscheinungen Veranlassung geben.

Äusserst merkwürdig schien mir jedenfalls bei meinen Beobachtungen der Umstand, dass innerhalb des ganzen Gebietes etwa von der Feldstärke 3,0 Gauss an aufwärts bis zu dem Felde 5,0 nach einer Änderung im Primärstrom am Galvanometer zunächst ganz deutliche kurze Zuckungen nach links eintraten, ehe die eigentliche Elongation nach rechts erfolgte. Man könnte dieses Phänomen höchstens noch auf Rechnung der Wirbelströme setzen.

Messend dürfte etwaigen Molekularinduktionsströmen so leicht nicht beizukommen sein.

So komme ich denn zu dem

IX. Endresultat.

Bei der ballistischen Untersuchung des in einem massiven Nickelring induzierten Magnetismus zeigte sich in allen Feldern zwischen 0 und dem zur Erzeugung des Maximums der Permeabilität erforderlichen $\mathfrak{H}$ eine in eigentümlich geschwungenen und sich sogar durchkreuzenden Kurven darstellbare Abhängigkeit der Maximalinduktion von der Stufenzahl.

Die verschiedenen theoretisch etwa möglichen Ursachen hierfür im Einzelnen experimentell nachzuweisen ist nicht gelungen. Man kann sich dabei vorläufig nur auf Vermutungen stützen.

In Übereinstimmung mit den Rücker'schen Beobachtungen bei Eisen und Stahl existiert auch beim Nickel eine Abhängigkeit dieser Erscheinung von der Feldstärke nicht.

Im Gegensatz zu Rücker konnte ferner konstatiert werden, dass auch zur Permeabilität keine einfache Bezie-

hung besteht. Das Rücker'sche Ergebnis darf daher nicht auf alle ferromagnetischen Substanzen verallgemeinert werden.

Die Remanenz variiert mit der Stufenzahl in ganz ähnlicher Weise wie die maximale Induktion.

Die Koërzitivkraft dagegen ist in allen Fällen als merklich konstant bleibend anzusehen.

Im Gegensatz zu Eisen und Stahl charakterisieren sich die Nachwirkungskurven beim Nickel durch einen ungemein raschen, starken Abfall und ein sich daran ziemlich unvermittelt anschliessendes langsames Abklingen. Die Intensität dieses Restbetrages ist indessen äusserst gering.

Nickeldraht weist gegenüber einer massiven Nickelmasse sehr stark veränderte magnetische Eigenschaften auf, die höchst wahrscheinlich in den bei der Herstellung des Drahtes (d. h. dem Vorgang des Drahtziehens) wirksamen mechanischen Einflüssen ihre Erklärung finden.

Die vorliegenden Untersuchungen wurden vom September 1907 bis März 1908 im Physikalischen Institut der Universität Halle a. S. durchgeführt.

Es ist mir zum Schlusse eine angenehme Pflicht, meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. Dorn, für die freundliche Anregung zu dieser Arbeit und die mir bei Ausführung derselben zuteil gewordene stete liebenswürdige Unterstützung meinen verbindlichsten Dank auszusprechen.

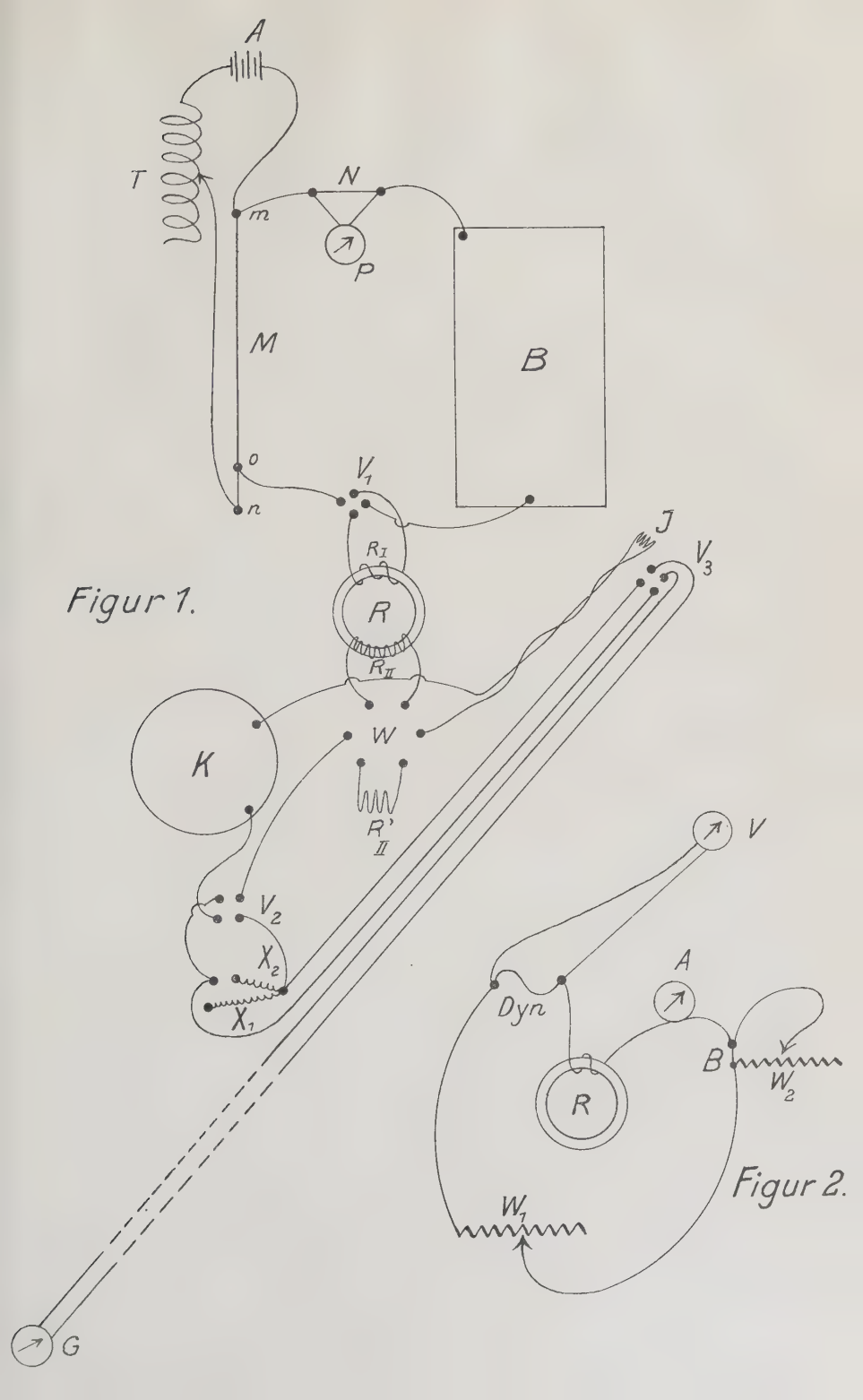
Lebenslauf.

Geboren bin ich, Richard Reinicke, evangelischer Konfession, am 10. Juni 1883 zu Cöthen (Anhalt) als ältester Sohn des Schlossermeisters Franz Reinicke und seiner Ehefrau Auguste geb. Richter. Meine Schulbildung erhielt ich 5 Jahre lang auf der Mittelschule, weitere 5 Jahre auf der Herzogl. Friedrichs-Realschule meiner Vaterstadt und endlich die letzten 3 Jahre auf der Oberrealschule der Franckeschen Stiftungen zu Halle a. S., die ich Ostern 1903 mit dem Zeugnis der Reife verliess. Seitdem lag ich an der Universität Halle—Wittenberg dem Studium speziell der Chemie, Physik, Mathematik und Psychologie ob. Am 17. Juni 1907 bestand ich das chemische Verbandsexamen, am 25. Juli 1908 die mündliche Doktorprüfung.

Während meines Studiums waren meine Lehrer die Herren Professoren:

Cantor, Conrad, Dorn, Ebbinghaus, Fries, Grenacher, Gutzmer, Luedecke, Riehl, Volhard, Vorländer, Wangerin.

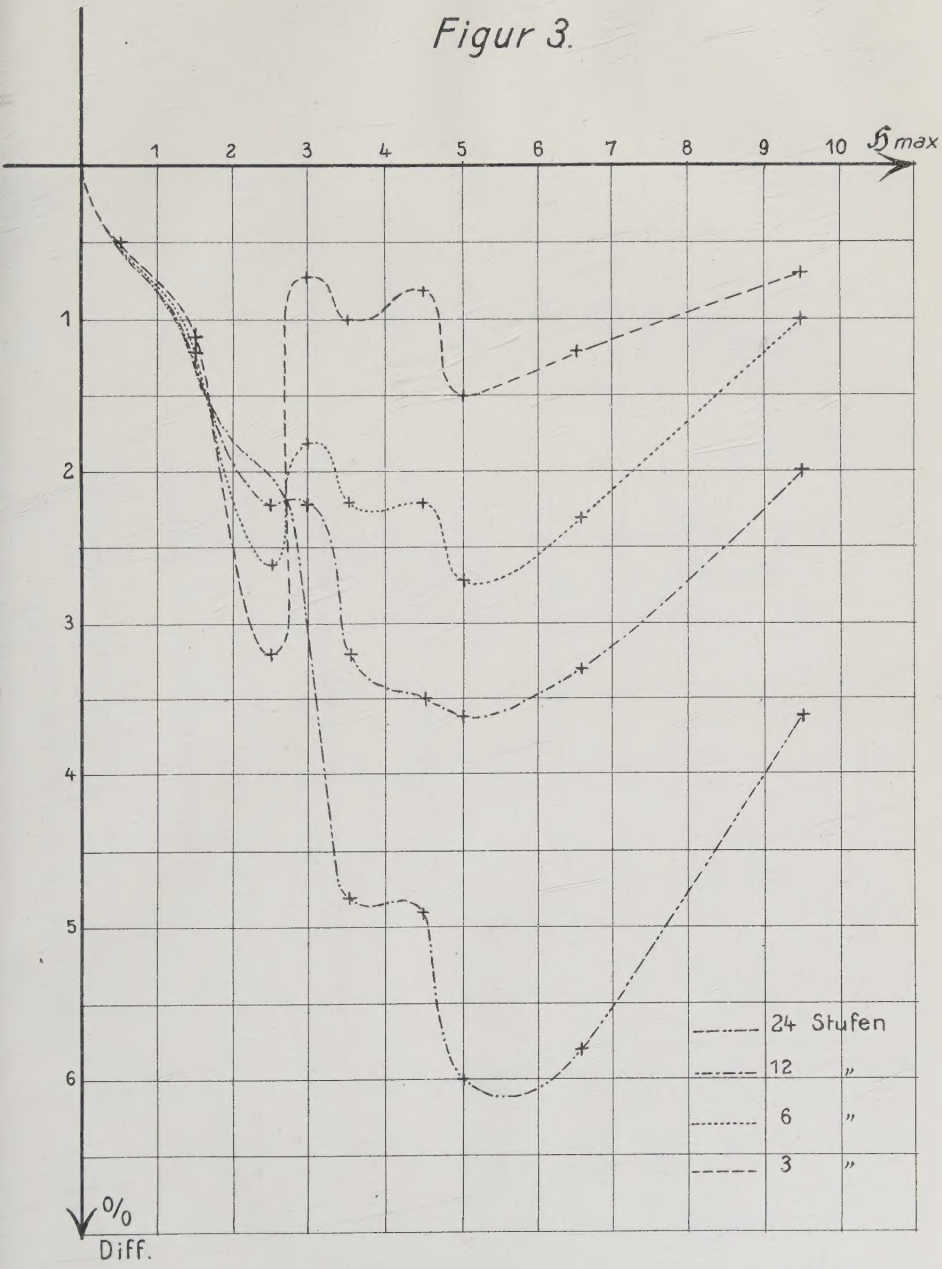
Ich versichere dieselben meines dauernden Dankes.

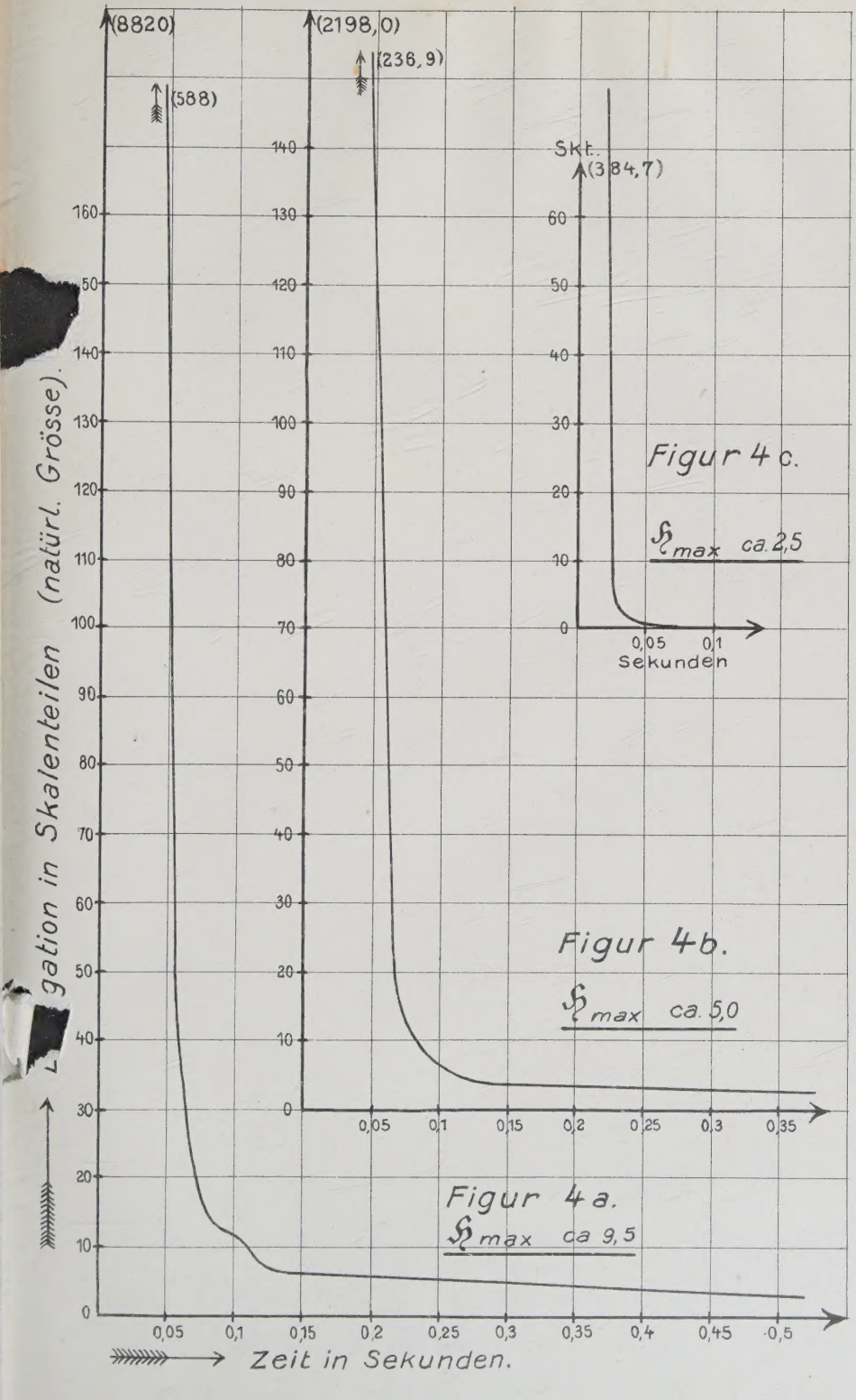


Figur 1.

Figur 2.

Figur 3.




(8820)
(588)
(2198,0)
(236,9)
Skt.
(384,7)
Figur 4 c.
$\mathfrak{H}_{max}$ ca. 2,5
0,05
0,1
Sekunden
Figur 4b.
$\mathfrak{H}_{max}$ ca. 5,0
Figur 4a.
$\mathfrak{H}_{max}$ ca 9,5
Zeit in Sekunden.